Ch.5. CINEMATIQUE ET DYNAMIQUE NEWTONIENNE

Temps, mouvement et évolution

Notions et contenus	Compétences exigibles
Temps, cinématique et dynamique newtoniennes Description du mouvement d'un point au cours du temps : vecteurs position, vitesse et accélération	Extraire et exploiter des informations relatives à la mesure du temps pour justifier l'évolution de la définition de la seconde. Choisir un référentiel d'étude. Définir et reconnaître des mouvements (rectiligne uniforme, rectiligne uniformément varié, circulaire uniforme, circulaire non uniforme) et donner dans chaque cas les caractéristiques du vecteur accélération. Définir la quantité de mouvement d'un point matériel
Référentiel galiléen. Les 3 lois de Newton	Connaître et exploiter les trois lois de Newton ; les mettre en œuvre pour étudier des mouvements dans des champs de pesanteur et électrostatique uniformes. *Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour étudier un mouvement.*

I. LA CINEMATIQUE

Introduction : : En physique, la cinématique est la discipline de la mécanique qui étudie le mouvement des systèmes matériels. On étudiera des systèmes de petites dimensions assimilés à un point (système ponctuel). Le mouvement d'un objet, représentant le système, est défini par :

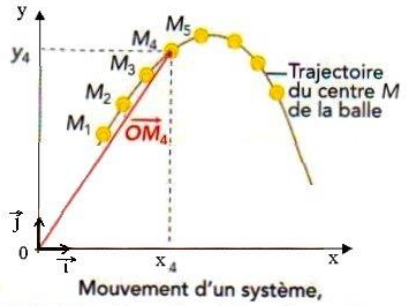
a) Le référentiel d'étude auquel on associe une horloge pour le repérage du temps.

Un référentiel d'étude est composé d'un solide par rapport auquel on étudie le mouvement du système matériel. Le repère lié au référentiel est constitué de trois vecteurs unitaires orthogonaux et d'un point origine O. Exemple le repère cartésien R orthonormé: R (O, $\vec{\imath}$, $\vec{\jmath}$, $\vec{k}$) .

b) sa trajectoire qui correspond à l'ensemble de ses positions successives au cours du temps.

c) son vecteur vitesse en chaque instant

d) son vecteur accélération en chaque instant



Mouvement d'un système, trajectoire et représentation d'un vecteur position dans le repère orthonormé (O; $\vec{\imath}$, $\vec{\jmath}$)

1) Le vecteur position :

On se limitera à un vecteur position dans un repère à 2 dimensions. La position d'un point M est définie Dans le repère orthonormé R (O, $\vec{\imath}$, $\vec{\jmath}$) lié au référentiel, le système ponctuel est assimilé à un point M.

Le vecteur position $\overrightarrow{OM}$ est $\overrightarrow{OM} = x.\vec{\imath} + y\,\vec{\jmath}$. x et y sont les coordonnées du vecteur position. Unité : m dans le S.I.

x et y peuvent dépendre du temps : x(t) et y(t). On peut utiliser l'écriture simplifiée x et y.

2) Le vecteur vitesse :

Le vecteur vitesse caractérise la variation du vecteur position en fonction du temps.

• Dans un référentiel donné, le vecteur vitesse instantanée à l'instant t d'un point M du système, noté $\vec{v}\,(t)$, est égale à la dérivée du vecteur position $\overrightarrow{OM}$ par rapport au temps:

$$\vec{v}\,(t) = \mathrm{d}\left(\frac{\overrightarrow{OM}}{dt}\right)_t = \mathrm{d}\left(\frac{x.\vec{\imath}+y.\vec{\jmath}}{dt}\right)_t = \frac{dx}{dt}\vec{\imath} + \frac{dy}{dt}\vec{\jmath} = v_x\,.\,\vec{\imath} + v_y\,\vec{\jmath} \qquad \boxed{\vec{v}\,(t) = \frac{dx}{dt}\vec{\imath} + \frac{dy}{dt}\vec{\jmath} = v_x\,.\,\vec{\imath} + v_y\,\vec{\jmath} = \dot{x}\,.\,\vec{\imath} + \dot{y}\,.\,\vec{\jmath}}$$

v_x et v_y sont les coordonnées du vecteur vitesse dans le repère cartésien orthonormé R. Unité légale: m.s^{-1}.

• Le vecteur vitesse moyenne est égale à la variation du vecteur position $\overrightarrow{OM}$ divisé par la durée Δt du parcours : $\vec{v}_{moy} = \frac{\Delta\overrightarrow{OM}}{\Delta t}$

Δ représente une grande variation alors que 'd' représente une petite variation. On assimile le vecteur vitesse moyenne au vecteur vitesse instantanée quand la valeur Δt tend vers 0 : $\vec{v}\,(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\overrightarrow{OM}}{\Delta t} = \mathrm{d}\left(\frac{\overrightarrow{OM}}{dt}\right)_t$

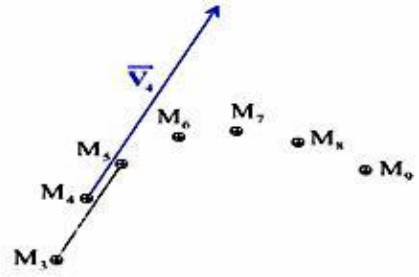
Exemple: si v_x =2,0 m.s^{-1} et v_y = 4,0 m.s^{-1} cela signifie que le solide se déplace avec une vitesse de 2 m.s^{-1} sur l'axe des x et de 4 m.s^{-1} sur l'axe des y.

La valeur ou norme de la vitesse sera: $v = \|\vec{v}\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{2{,}0^2 + 4{,}0^2} = 4{,}5\ m.s^{-1}$.

• Caractéristiques du vecteur vitesse au point M sont:

$\vec{v}\,(t)$ | point d'application : le point M
direction : droite tangente à la trajectoire
sens : celui du mouvement
valeur : $v = \|\vec{v}\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$
dans le S.I. en m.s^{-1}.

Pour représenter le vecteur vitesse on utilisera une **échelle :** Par exemple 1 cm représente 0,25 m.s^{-1}.



Exemple: vecteur vitesse d'un point M mobile à l'instant t_4:

$\vec{v}_4(t_4)$ | point d'application : le point M
direction : droite tangente à la trajectoire
sens : celui du mouvement
valeur : $v = \|\vec{v}\| = 0{,}375$ m.s^{-1}

Méthode pour tracer le vecteur vitesse instantanée

Numéroter les points.

Tracer le vecteur vitesse en M_4.

Il se note : $\vec{v}_4(t_4) = \frac{\overrightarrow{M_3M_5}}{2.\tau}$ τ étant l'intervalle de temps entre 2 points successifs. Ex : τ = 20 ms.

On mesure le segment M_3M_5 (attention à l'échelle éventuelle) : 1,5 cm (à vérifier) On calcule $v_4 = \frac{M_3M_5}{2.\tau}$ en m.s^{-1}. $v_4 = \frac{1{,}5\ x\ 10^{-2}}{2\ x\ 20\ .10^{-3}} = 0{,}375$ m.s^{-1}.

On choisit une échelle pour la vitesse. Ex : 1 cm représente 0,125 m.s^{-1}.

On trace le vecteur vitesse tangent à la courbe au point M_4, c'est-à-dire parallèle à M_3M_5 et orienté dans le sens du mouvement.

Avec l'échelle choisie, on doit donc faire un vecteur de .....0.375/0.125 soit 3,0 cm de long pour la longueur de $\vec{v}_4$ (point d'application M_4).

http://physiquark.free.fr/IMG/swf/tracervecteurvitesse.swf

On peut généraliser pour déterminer le vecteur vitesse $\vec{v}_i$ à une date t_i quelconque : $\vec{v}_i = \frac{\overrightarrow{M_{i-1}M_{i+1}}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$

3) Le vecteur accélération

Le vecteur accélération caractérise la variation du vecteur vitesse en fonction du temps.

• Dans un référentiel donné, le **vecteur accélération** instantanée à l'instant t d'un point M du **système,** noté $\vec{a}$ (t), est égale à la **dérivée** du **vecteur vitesse instantanée** $\vec{v}(t)$ par rapport au temps:

$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{d(\vec{v})}{dt}_t = \frac{d(v_x.\vec{\imath} + v_y.\vec{\jmath})}{dt}_t = \frac{dv_x}{dt}\vec{\imath} + \frac{dv_y}{dt}\vec{\jmath} = a_x.\vec{\imath} + a_y.\vec{\jmath}$ $\quad \vec{a}(t) = \frac{dv_x}{dt}\vec{\imath} + \frac{dv_y}{dt}\vec{\jmath} = \mathbf{a_x.\vec{\imath} + a_y.\vec{\jmath}}$

a_x et a_y sont **les coordonnées** du vecteur vitesse dans le repère cartésien orthonormé R. **Unité dans le S.I.** : m par s au carré (**$m.s^{-2}$**).

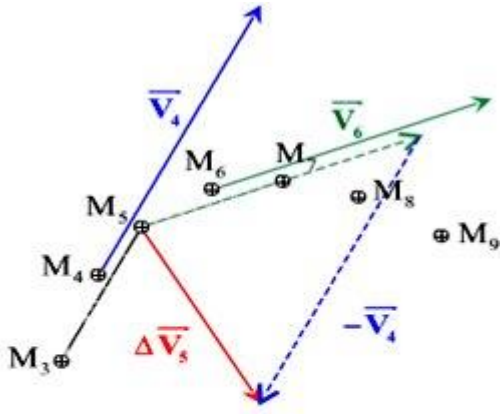
a_x est la **dérivée première** par rapport au temps de la coordonnée de la **vitesse v_x** sur l'axe des x; c'est la **dérivée seconde** par rapport au temps de **l'abscisse x.** $a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}$

De même **a_y** est la **dérivée première** par rapport au temps de la coordonnée de la **vitesse v_y** sur l'axe des y; c'est la **dérivée seconde** par rapport au temps de **l'ordonnée y.** $a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} = \ddot{y}$

Exemple 1: si a_x =2,0 $m.s^{-2}$ et a_y = 4,0 $m.s^{-2}$ cela signifie que le solide voit sa vitesse varier de 2 $m.s^{-1}$ en une seconde sur l'axe des x et de 4 $m.s^{-1}$ en une seconde sur l'axe des y. La valeur ou norme de l'accélération sera: $a = \|\vec{a}\| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{2{,}0^2 + 4{,}0^2} = 4{,}5\ m.s^{-2}$.

Exemple 2: Les caractéristiques du vecteur accélération au point M sont:

$\vec{a}$(t)
- point d'application : le point M
- direction : identique à celle du vecteur variation de vitesse $\Delta\vec{v}$
- sens : celui du vecteur variation de vitesse $\Delta\vec{v}$
- valeur : $a = \|\vec{a}\| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$ en $m.s^{-2}$ dans le S.I.



Méthode pour tracer le vecteur accélération instantanée.

Le vecteur vitesse $\overrightarrow{a_i}$ à une date t_i quelconque :

$\overrightarrow{a_i} = \frac{\overrightarrow{v_{i+1}} - \overrightarrow{v_{i-1}}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$

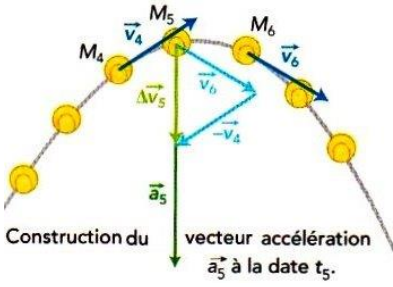
Tracé d'un vecteur variation de vitesse puis d'un vecteur accélération

On désire tracer le vecteur accélération $\overrightarrow{a_5}$ à l'instant t_5:

$\overrightarrow{a_5} = \frac{\overrightarrow{v_6} - \overrightarrow{v_4}}{t_6 - t_4} = \frac{\overrightarrow{v_6} - \overrightarrow{v_4}}{2\tau}$ avec τ = 60 ms

1.Tracer les vecteurs $\overrightarrow{v_6}$ (point d'application M_6) et $\overrightarrow{v_4}$ (point d'application M_4)

2. Tracer le vecteur variation de vitesse $\Delta\overrightarrow{v_5} = \overrightarrow{v_6} - \overrightarrow{v_4}$ (point d'application M_5)
Pour cela : reporter $\overrightarrow{v_6}$ au point M_5. Construire le vecteur $-\overrightarrow{v_4}$ depuis l'extrémité de $\overrightarrow{v_6}$ reconstruit juste avant.
Le vecteur $\Delta\overrightarrow{v_5} = \overrightarrow{v_6} - \overrightarrow{v_4}$ est le vecteur qui joint l'origine de $\overrightarrow{v_6}$, soit point M_5, à l'extrémité de $-\overrightarrow{v_4}$.



3. Mesurer la longueur du vecteur $\Delta\overrightarrow{v_5}$ et déterminer sa valeur $\Delta v_5 = \|\overrightarrow{\Delta v_5}\| = \|\overrightarrow{v_6} - \overrightarrow{v_4}\|$ grâce à l'échelle de vitesse.
Longueur de $\Delta\overrightarrow{v_5}$ = 2,8 cm.... Or échelle de vitesse : Par exemple 1 cm représente 0,25 $m.s^{-1}$
donc Δv_5 = ...0,25 x 2,8 = 0,7 $m.s^{-1}$

4. Calculer la norme du vecteur accélération grâce à la formule : $a_5 = \|\overrightarrow{a_5}\| = \frac{\|\overrightarrow{v_6} - \overrightarrow{v_4}\|}{2.\tau} = \frac{\|\overrightarrow{\Delta v_5}\|}{2.\tau}$ = ...
= $\frac{0{,}7}{2\ x\ 0{,}06}$ = 5,8 $m.s^{-2}$

5. Choisir une échelle d'accélération par exemple 1,0 cm ⇔ 1,0 $m.s^{-2}$. En déduire la longueur du vecteur accélération : **5,8 cm**

6. Tracer le vecteur accélération $\overrightarrow{a_5}$ qui a pour origine le point M_5, le sens celui de $\Delta\overrightarrow{v_5}$, une longueur de ....5,8 cm,
une direction : celle du vecteur variation de vitesse $\Delta\overrightarrow{v_5}$.

http://physiquark.free.fr/IMG/html/VecteurA.html

4) Le vecteur quantité de mouvement :

Le vecteur quantité de mouvement $\vec{p}$ point matériel est égal au produit de sa masse *m* par son vecteur vitesse $\vec{v}$: $\vec{p} = m.\vec{v}$
Comme pour la vitesse, la quantité de mouvement dépend du référentiel. **$\vec{p}$ est colinéaire et de même sens que le vecteur vitesse.**
Dans le système international d'unités, la valeur de la quantité de mouvement est exprimée en kg. m $.s^{-1}$.

Les caractéristiques du vecteur quantité de mouvement sont :

$\vec{p}$
- Point d'application : le point M
- Direction : celui du vecteur vitesse
- **Sens : celui du mouvement**
- **Valeur : $p = \|\vec{p}\| = m.v$ en kg.m.s^{-1}.**

a) Calculer la quantité de mouvement d'un oiseau de 5,0 kg qui vole à la vitesse de 8,0 m/s.
b) Calculer la quantité de mouvement d'un camion de 500,0 kg au repos.

Réponse : a) $\vec{p} = m.\vec{v}$.
b) En valeur : p = m.v = 5,0 x 8,0 = 40 kg.m.s^{-1}.

II. MOUVEMENTS RECTILIGNES ET MOUVEMENTS CIRCULAIRES ?

1) Les mouvements rectilignes

Au cours d'un mouvement rectiligne, la trajectoire d'un point M est une droite. Il existe 3 types de mouvements rectilignes: mouvement rectiligne uniforme, mouvement rectiligne uniformément varié, mouvement rectiligne quelconque.

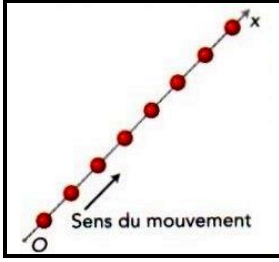
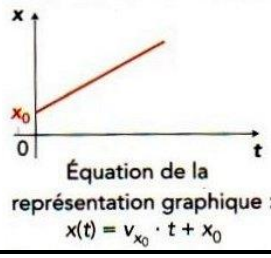
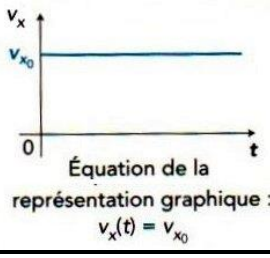
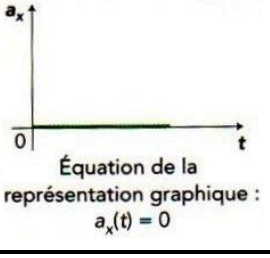
a) Les mouvements rectilignes uniformes

- Le mouvement d'un système est rectiligne et uniforme lorsque la trajectoire est une portion de droite et la valeur de sa vitesse est constante.
  http://www.ostralo.net/3_animations/swf/CentreIinertie.swf

Dans un référentiel donné, un système a un **mouvement rectiligne uniforme** si son vecteur vitesse a toujours même direction, même sens et même valeur : il est constant **: $\vec{v} = \overrightarrow{constante}$, trajectoire : une droite ⇔ mouvement rectiligne uniforme** . Son vecteur accélération est alors égal au vecteur nul, quelque soit t.

$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{0}$ écrit d'une autre façon : $\overrightarrow{a_i} = \frac{\overrightarrow{v_{i+1}} - \overrightarrow{v_{i-1}}}{t_{i+1} - t_{i-1}} = \vec{0}$

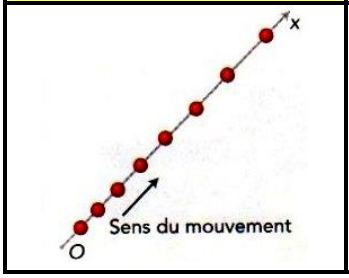
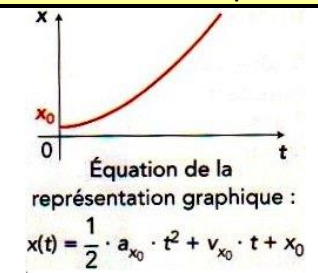
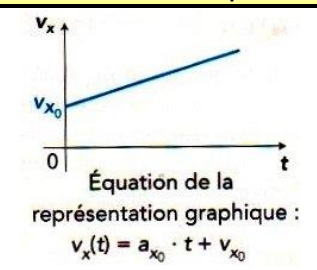
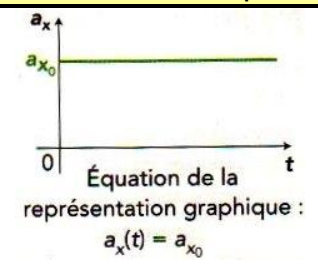
- **Les graphiques suivants caractérisent un mouvement rectiligne et uniforme sur un axe *(Ox)*** orienté dans le sens du mouvement :

Chronophotographie d'un **mouvement rectiligne uniforme** sur un axe (Ox)	Représentation graphique de la **coordonnée x de la position en fonction du temps**	Re présentation graphique de la **coordonnée V_x de la vitesse en fonction du temps**	Représentation graphique de la **coordonnée a_x de l'accélération en fonction du temps**
	 Équation de la représentation graphique : $x(t) = v_{x_0} \cdot t + x_0$	 Équation de la représentation graphique : $v_x(t) = v_{x_0}$	 Équation de la représentation graphique : $a_x(t) = 0$

b) Les mouvements rectilignes uniformément variés

Dans un référentiel donné, le mouvement d'un système est **rectiligne et uniformément varié lorsque** sa trajectoire est une portion de **droite** et la **valeur de son accélération est constante.** **$\vec{a} = \overrightarrow{constante}$, trajectoire : une droite ⇔ mouvement rectiligne uniformément varié.**
La valeur de la vitesse est alors une fonction affine du temps.

Le mouvement rectiligne est accéléré si le vecteur accélération est dans le sens du vecteur vitesse. Le mouvement est décéléré (ralenti) si le vecteur accélération est dans le sens opposé.

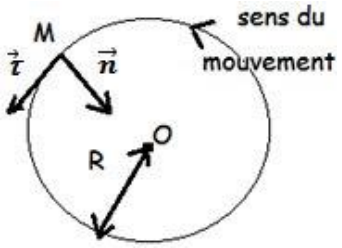
Chronophotographie d'un **mouvement rectiligne uniformément accéléré**	Représentation graphique de la **coordonnée x de la position en fonction du temps**	Représentation graphique de la **coordonnée V_x de la vitesse en fonction du temps**	Représentation graphique de la **coordonnée a_x de l'accélération en fonction du temps**
	 Équation de la représentation graphique : $x(t) = \frac{1}{2} \cdot a_{x_0} \cdot t^2 + v_{x_0} \cdot t + x_0$	 Équation de la représentation graphique : $v_x(t) = a_{x_0} \cdot t + v_{x_0}$	 Équation de la représentation graphique : $a_x(t) = a_{x_0}$

c) Les mouvements rectilignes quelconques

Dans un référentiel donné le mouvement d'un point M est **rectiligne quelconque** si en chaque instant son vecteur accélération et vitesse est quelconque et que sa **trajectoire** est une **droite.**

3) Les mouvements circulaires :

Dans le cas des mouvements circulaires, on utilisera le **repère de Frénet** (M,$\vec{n}$, $\vec{\tau}$) pour exprimer les vecteurs vitesse accélération et position. Ce repère est constitué d'un point M où se trouve le mobile à l'instant t et de deux vecteurs orthonormés $\vec{n}$: vecteur unitaire normal à la trajectoire noté aussi $\overrightarrow{u_N}$. Ce vecteur est orienté vers l'intérieur de la courbe et τ : vecteur unitaire tangent à la trajectoire noté aussi $\overrightarrow{u_T}$; Ce vecteur est orienté arbitrairement (pas nécessairement dans le sens du mouvement)).



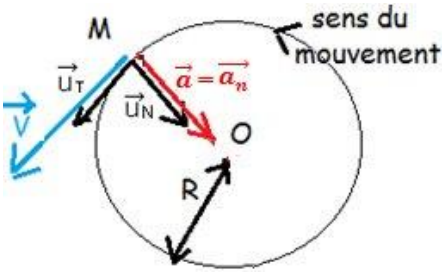
Dans ce cours on verra 2 types de mouvement circulaire.

a) Mouvement circulaire uniforme

Dans un référentiel donné le mouvement d'un point M est **circulaire uniforme** si en chaque instant la valeur v de la **vitesse** est **constante** et que la **trajectoire** est une portion de **cercle** de rayon R. Le **vecteur accélérat**ion est **centripète** (orienté vers le centre de la trajectoire). Les coordonnées des vecteurs position, vitesse et accélération sont, dans la base de Frénet:

$\overrightarrow{OM} = -\,R.\vec{n}$; $\vec{v} = v.\vec{\tau}$; $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = a_n.\vec{n} + a_T.\vec{\tau} = \frac{v^2}{R}\vec{n} + \frac{dv}{dt}.\vec{\tau}$ avec $\mathbf{a_N} = \frac{v^2}{R}$: coordonnées de l'accélération normale > 0 et

$\mathbf{a_T} = \frac{dv}{dt} = \mathbf{0}$ (car v = constante) : coordonnées de l'accélération tangentielle.



Dans un référentiel donné, un système a un mouvement **circulaire uniforme** si sa trajectoire est une portion de cercle de rayon *R* et si la valeur v de sa vitesse est constante. **Le vecteur accélération est alors centripète**, de valeur a constante : $\mathbf{a = a_n = \frac{v^2}{R}}$

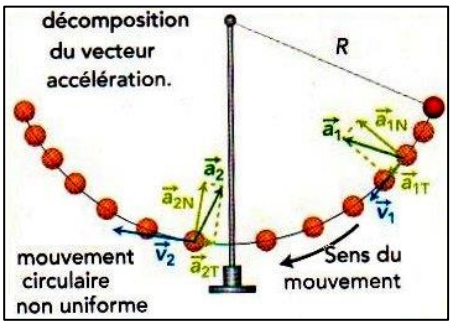
b) Mouvement circulaire non uniforme

Dans un référentiel donné le mouvement d'un point M est **circulaire non uniforme** si, en chaque **instant, la valeur de sa vitesse n'est pas constante** et que la trajectoire est une portion de cercle de rayon R. En chaque instant les coordonnées des vecteurs accélération, vitesse et position sont dans le repère de Frénet:

$\overrightarrow{OM} = -R.\vec{n}$; $\vec{v} = v.\vec{\tau}$; $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = a_n.\vec{n} + a_T.\vec{\tau} = \frac{v^2}{R}\vec{n} + \frac{dv}{dt}.\vec{\tau}$ avec

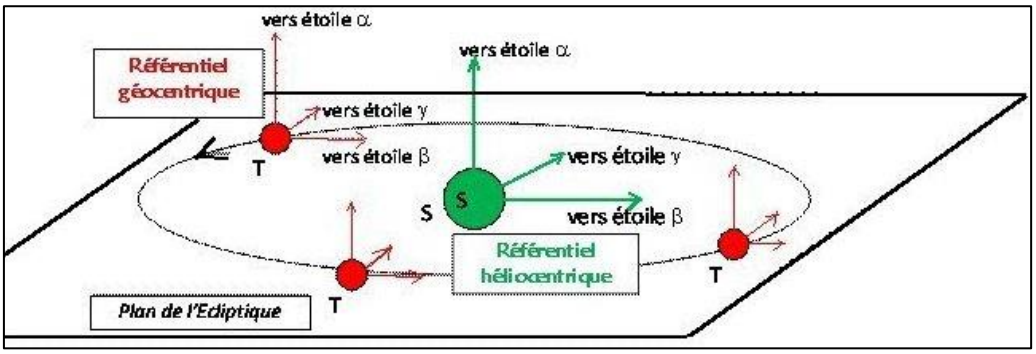
$a_N = \frac{v^2}{R}$: coordonnées de l'accélération normale > 0 et $a_T = \frac{dv}{dt}$ coordonnées de l'accélération tangentielle.

Voir exercices p. 143 n°2, et p. 147-148 n°14 à 16.



III. DYNAMIQUE - LES TROIS LOIS DE NEWTON ?

Introduction:
La **dynamique** est une discipline de la mécanique classique qui étudie les corps en mouvement sous l'influence des actions mécaniques qui leur sont appliquées. Elle combine la statique qui étudie l'équilibre des corps au repos, et la cinématique qui étudie le mouvement.
Les 3 lois suivantes ne sont vérifiées que dans un référentiel galiléen. **Un référentiel dans lequel les lois de Newton sont vérifiées est dit galiléen.**



1) Référentiels galiléens

- **Référentiel terrestre**, lié à la surface de la Terre, (table, quai d'un train etc.) utilisé pour étudier les mouvements des solides au voisinage proche de la Terre
- **Référentiel géocentrique**, lié au centre de la Terre, utilisé pour étudier les mouvements des satellites de la Terre ainsi que celui de la Lune
- **Référentiel héliocentrique**, lié au centre du Soleil, pour étudier les mouvements des planètes autour du soleil.

2) Première loi de Newton ou principe d'inertie

Lorsqu'un système matériel est **pseudo isolé** (soumis à des forces qui se compensent) ou **isolé** (soumis à aucune force) par rapport à un référentiel galiléen alors soit :
- il est au **repos**
- le mouvement de son centre d'inertie est **rectiligne uniforme**. Son vecteur vitesse est alors constant.

La réciproque est vraie. $\sum\overrightarrow{F_{ext}} = \vec{0} \Leftrightarrow \overrightarrow{v_G}$ est constant.

Ex : Selon la première loi de Newton, s'il n'y avait pas de forces de frottement s'exerçant sur la pierre de curling en mouvement, elle ne s'arrêterait jamais.
La pierre de curling, une fois lancée, a un mouvement rectiligne uniforme, car il n'y a pratiquement pas de frottement.
Lorsqu'un système est isolé ou pseudo-isolé, sa vitesse est constante, donc sa quantité de mouvement se conserve (puisque $\vec{p} = m.\vec{v}$).

3) Deuxième loi de Newton ou principe fondamental de la dynamique

Dans un **référentiel galiléen**, la **somme vectorielle** des **forces extérieures** appliquées à un système matériel est **égale** à la **dérivée par rapport au temps** de sa **quantité de mouvement**: $\sum\overrightarrow{F_{ext}} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ avec vecteur quantité de mouvement $\vec{p} = m.\vec{v}$

Dans le cas particulier ou le système conserve une masse constante, la seconde loi devient:

$\sum\overrightarrow{F_{ext}} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m.\vec{v})}{dt} = m.\frac{d\vec{v}}{dt} = m.\vec{a}$ $\quad \mathbf{\sum\overrightarrow{F_{ext}} = m.\vec{a}}$

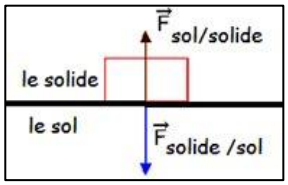
Exemple: dans le cas d'une chute libre sans frottement, la seule force s'exerçant sur une masse constante est son poids. La seconde loi devient:

$\sum\overrightarrow{F_{ext}} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m.\vec{a}$ soit $\vec{P} = m.\vec{a}$ soit $m.\vec{g} = m.\vec{a}$ Donc : $\vec{g} = \vec{a}$

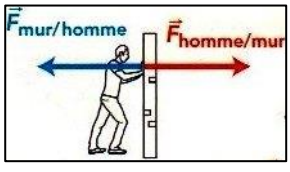
L'accélération de l'objet vaut a = 9,8 $m.s^{-2}$ = 9,8 $N.kg^{-1}$. Une 1 seconde la vitesse du solide augmente de 9,8 $m.s^{-1}$.

4) Troisième loi de Newton ou principe des actions réciproques

Lorsqu'un système matériel A exerce une force $\overrightarrow{F_{A/B}}$ sur un système matériel B alors celui-ci exerce sur le système matériel A une **force opposée** $\overrightarrow{F_{B/A}}$. Ces 2 **vecteurs forces** sont **opposés** (même direction et norme mais sens opposé et points d'application différents) : $\mathbf{\overrightarrow{F_{A/B}} = -\overrightarrow{F_{B/A}}}$.



Exemple: un solide exerce sur le sol une force de valeur $\vec{F}_{solide\ /\ sol}$ alors le sol exerce sur le solide est force de valeur $\vec{F}_{sol\ /\ solide}$ opposée tel que: $\vec{F}_{solide\ /\ sol} = -\vec{F}_{sol\ /\ solide}$.



5) Application des lois de Newton à la propulsion par réaction

Fusée au décollage :
Propulsion par réaction : Le moteur éjecte à très grande vitesse d'importantes quantités de gaz dans une direction donnée. Par réaction à la masse de gaz ainsi générée, le lanceur est propulsé dans la direction opposée.

• Remarque: Dans le cas où le système garde une masse constante on dit que le système est fermé. Dans le cas contraire il s'agit d'un système ouvert.
• Une fusée éjecte des gaz, le système {fusée} est ouvert.
Par contre le système {gaz, fusée} est fermé.
Lorsqu'une fusée expulse du gaz, la quantité de mouvement du gaz est l'opposé à la quantité de mouvement de la fusée, ce qui explique le principe de la propulsion par réaction.

Exemple : *On considère une fusée remplie de combustible, immobile dans l'espace et loin de tout corps célestes. L'étude se déroule dans un référentiel galiléen.*
a) Que peut-on dire du système fusée + combustible ?
b) Exprimer et calculer le vecteur quantité de mouvement totale $\overrightarrow{p_{tot}}$ pour du système {fusée + combustible}.
Pendant un intervalle de temps Δt, les moteurs brûlent 50 kg de combustible, qui est éjecté à 2600m/s. La fusée atteint alors une vitesse de 130 m/s.
c) Quelle est la masse de la fusée ?

a) **Le système n'est soumis à aucune force extérieure : le système {fusée + combustible} est donc un système isolé**. (On considère le déplacement uniquement dans l'espace de manière à pouvoir considérer le système comme isolé ou pseudo-isolé, c'est-à-dire libre de toute influence gravitationnelle).
b) On peut écrire la quantité de mouvement totale du système $\overrightarrow{p_{tot}}$ comme la somme de la quantité de mouvement de la fusée $\overrightarrow{p_{fus}}$ et du combustible $\overrightarrow{p_{comb}}$ soit $\overrightarrow{p_{tot}} = \overrightarrow{p_{fus}} + \overrightarrow{p_{comb}}$
• Initialement, la vitesse de la fusée et du combustible est nulle $\overrightarrow{p_{tot}}$ **(à t = 0) = $\vec{0}$.**
Après éjection du combustible, par conservation de la quantité de mouvement totale, on a toujours : $\overrightarrow{p_{tot}}$ **(à Δt) = $\vec{0}$** donc
$\overrightarrow{p_{fus}} + \overrightarrow{p_{comb}} = \vec{0}$. Or p = m.v Donc $m_{fus}.\overrightarrow{v_{fus}} + m_{com}.\overrightarrow{v_{comb}} = \vec{0}$ soit $m_{fus}.\overrightarrow{v_{fus}} = -m_{com}.\overrightarrow{v_{comb}}$, donc $\mathbf{m_{fus}} = \frac{-m_{com}.\overrightarrow{v_{com}}}{\overrightarrow{v_{fus}}}$
Les vecteurs sont en sens opposés ; lorsqu'on passe aux normes, ce sont des signes +. Donc $m_{fus} = \frac{m_{com}.v_{com}}{v_{fus}} = \frac{50.\ 2600}{130}$ = **1000 kg.**

Pour un système isolé immobile qui se sépare en deux parties, la conservation de la quantité de mouvement impose : $\overrightarrow{p_A} + \overrightarrow{p_B} = \vec{0}$ soit $\overrightarrow{p_A} = -\overrightarrow{p_B}$: les quantités de mouvement des deux parties sont opposées.
La conservation de la quantité de mouvement d'un système fermé permet d'expliquer la propulsion par réaction.

• ***Autre exemple :*** *Conservation de la quantité de mouvement lors* ***de la propulsion par réaction d'une barque.***
Après le saut, les vecteurs quantité de mouvement de A et de B sont opposés, donc les vitesses de A et de B sont opposés : la barque s'éloigne de la berge au moment du saut. Il y a propulsion par réaction.

• ***Autre exemple : Le billard.*** *Une boule de billard de vitesse initiale $\overrightarrow{v_1}$ dans le référentiel terrestre tape sur une boule initialement au repos et de même masse. Après le choc, la première boule reste immobile.*
a) Quelle est la propriété du référentiel terrestre ?
b) Que dire de la quantité de mouvement du système pseudo-isolé formé par les deux boules, assimilées à des points matériels.
c) Déduire les caractéristiques du mouvement de la seconde boule après le choc.
Solution : a) Le référentiel terrestre peut être considéré comme galiléen
b) Le système formé par les deux boules {boule 1 et boule 2} est pseudo-isolé : la quantité de mouvement de ce système se conserve.
c) La quantité de mouvement totale pour la boule 1 et 2 est : $\overrightarrow{p_{tot}} = \overrightarrow{p_1} + \overrightarrow{p_2}$
Initialement, la boule 2 est immobile, soit $\overrightarrow{p_{2\ avant}} = \vec{0}$. Après le choc, c'est la boule 1 qui est immobile. $\overrightarrow{p_{1\ après}} = \vec{0}$.
Conservation de la quantité de mouvement : $\overrightarrow{p_{1\ avant}} + \overrightarrow{p_{2\ avant}} = \overrightarrow{p_{1\ après}} + \overrightarrow{p_{2\ après}}$ donc
$\overrightarrow{p_{1\ avant}} + \vec{0} = \vec{0} + \overrightarrow{p_{2\ après}}$. La quantité totale de mouvement est passée de la boule 1 à la boule 2 soit $m.\overrightarrow{v_{1\ avant}} = m.\overrightarrow{v_{2\ après}}$
soit $\overrightarrow{v_{1\ avant}} = \overrightarrow{v_{2\ après}}$. Les vecteurs vitesse sont dans le même sens. En valeur : $v_{1\ avant} = v_{2\ après}$.

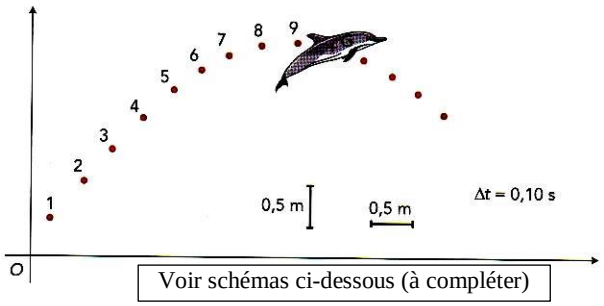
• ***Autre exemple :*** *Une pierre pour avancer : Louisa est assise dans un canoë au milieu d'un lac. Le canoë est immobile et Louisa, qui a perdu sa pagaie, souhaite regagner la rive avec son embarcation. Elle ne dispose alors que d'une pierre présente dans son canoë. Se rappelant de ses cours de Terminale, elle décide de la jeter par-dessus bord, horizontalement vers l'arrière de l'embarcation. On définit le système (S), constitué de Louisa, du canoë et de la pierre.*
Données : Masse de Louisa : m_L = 55 kg ; Masse du canoë : m_c = 39 kg ; Masse de la pierre : m_p = 4,2 kg ; Vitesse de la pierre : v_p = 2, 5 m.s^{-1}.
On néglige les frottements dus à l'air et l'eau.
a) Sans justifier, indiquer ce qui va se passer après le lancer
b) Avant le lancer, le système (S) est-il isolé ou pseudo-isolé ?
c) Quel est le vecteur quantité de mouvement avant le lancer $\overrightarrow{p_{avant}}$ (S) ?
d) Exprimer puis calculer la valeur de la vitesse v du canoë (et de Louisa) après le lancer.
e) Dans quel sens se déplace le canoë après le lancer.
f) Quelle est alors la nature du mouvement du canoë ? Est-ce cohérent avec une situation réelle ? Justifier.

a) Si Louisa lance la pierre vers l'arrière, le canoë va aller en sens inverse donc va se rapprocher de la rive.
b) Le système {Louisa, canoë et pierre} est soumis à 2 forces qui se compensent : Le poids appliqué au système, est vertical vers le bas ; la poussée d'Archimède, verticale et dirigée vers le haut, de norme égale au poids : **le système est donc pseudo-isolé**
c) Initialement le canoë contenant Louisa et la pierre sont immobiles sur le lac. $\overrightarrow{p_{avant}}$ **(S) = $\vec{0}$.**
d) Le système S est pseudo-isolé : on peut appliquer la conservation de la quantité de mouvement : $\overrightarrow{p_{avant}}$ **(S) = $\overrightarrow{p_{après}}$ (S)** **avec ici $\overrightarrow{p_{avant}}$ (S) = $\vec{0}$.**
Donc : $\vec{0} = (m_L + m_c)\cdot\vec{v} + m_p \cdot \overrightarrow{v_p}$ soit $(m_L + m_c)\cdot\vec{v} = -m_p \cdot \overrightarrow{v_p}$ soit $\vec{v} = -\frac{m_p.\overrightarrow{v_p}}{m_L + m_C}$ La vitesse du canoë $\vec{v}$ est de sens opposé à la vitesse de la pierre $\overrightarrow{v_p}$. Norme : $v = \frac{m_p.v_p}{m_L + m_c}$ A.N. : $v = \frac{4,2 * 2,5}{55+39}$ = **0,11 m.s^{-1}**.
e) Le canoë se déplace en sens opposé à la pierre. Le canoë avec Louisa se rapproche de la rive.
f) Le mouvement du canoë est rectiligne uniforme (puisque la vitesse est constante). Cela correspond à une situation idéale, car on néglige tous frottements. En réalité, du fait des frottements de l'eau sur l'embarcation, on aurait plutôt un mouvement rectiligne ralenti.

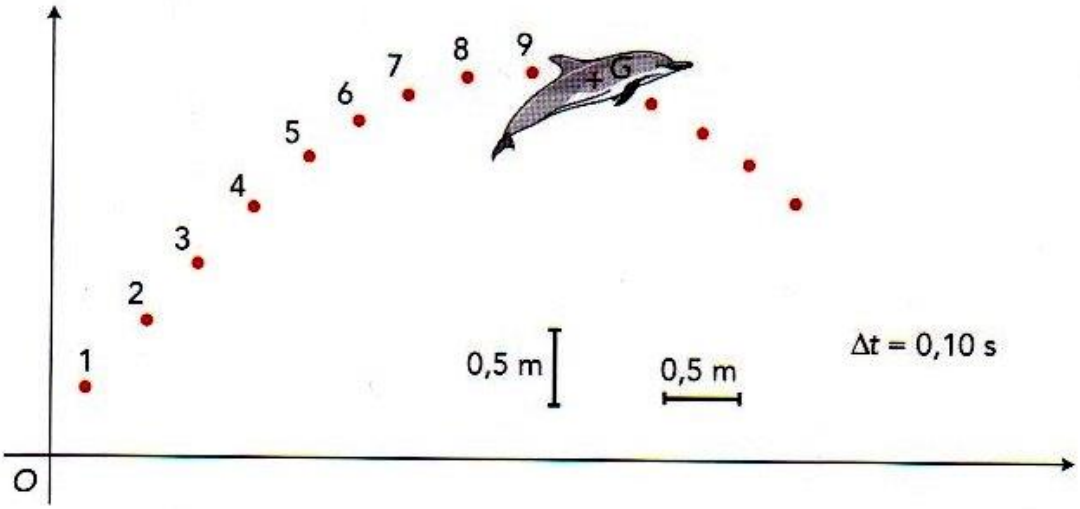
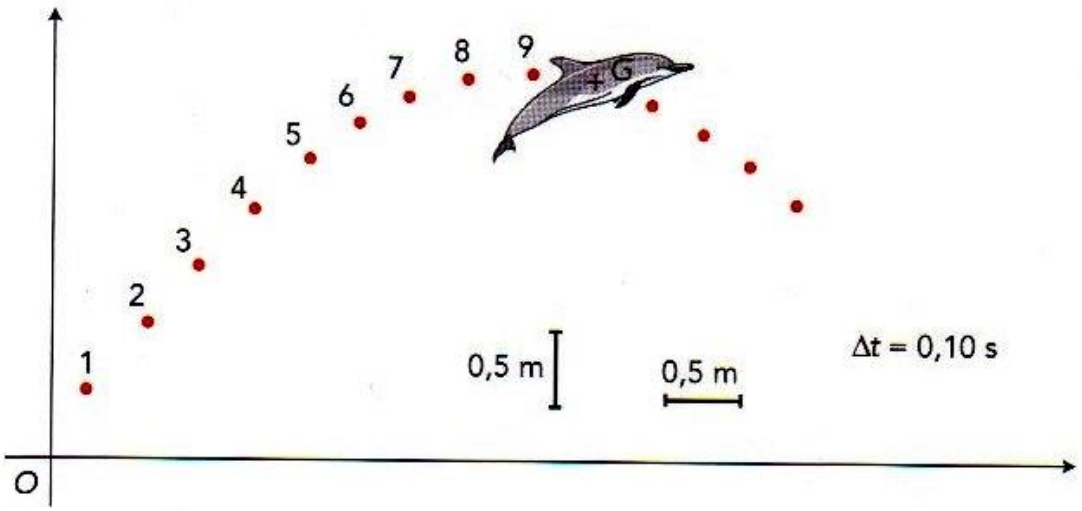
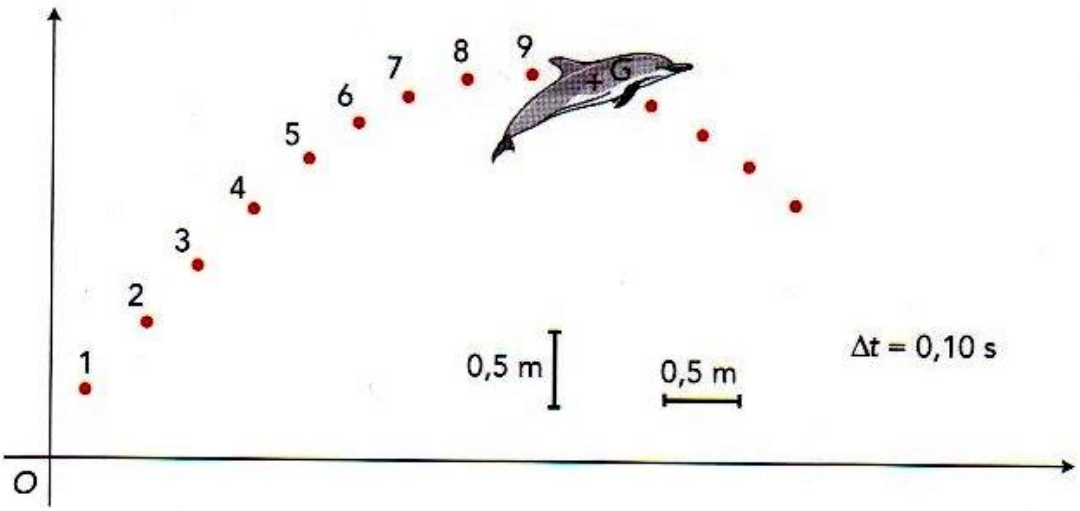
Ch.5. EXERCICE (à faire) p : 153 n°35. CINEMATIQUE ET DYNAMIQUE NEWTONIENNE

BAC : Le dauphin à flancs blancs

Le dauphin à flancs blancs du pacifique est très sociable, puissant et très joueur, il adore sauter hors de l'eau.



Voir schémas ci-dessous (à compléter)

Les positions du centre de gravité *G* d'un dauphin au cours d'un saut sont représentées à intervalles de temps égaux sur le document ci-dessous. L'échelle de représentation est indiquée sur le document. La durée entre deux positions consécutives est Δt = 0,10 s.

1. Quel référentiel est adapté à l'étude de ce mouvement ? À partir du document, déterminer les coordonnées du point 8.
2. Décalquer le document. Représenter les vecteurs positions aux points 3, 5, 7.
3. Calculer la valeur de la vitesse du centre de gravité G du dauphin aux points 4 et 6.
4. On note $\overrightarrow{v_4}$ et $\overrightarrow{v_6}$ les vecteurs vitesses aux points 4 et 6. Tracer ces vecteurs vitesses en utilisant l'échelle 1 cm pour 2 m.s^{-1}.
5. Construire sur le même document le vecteur $\overrightarrow{\Delta v_5} = \overrightarrow{v_6} - \overrightarrow{v_4}$ au point 5 et déterminer sa valeur en m.s^{-1} en utilisant l'échelle précédente.
6. En déduire la valeur a_5 du vecteur accélération $\overrightarrow{a_5}$ au point 5 en m.s^{-2}.
7. Représenter ce vecteur sur le document en choisissant comme échelle de représentation : 1 cm pour 2 m.s^{-2}.